

תנועה בראונית

ספרות מומלצת

1. The time, size, viscosity, and temperature dependence of the Brownian motion of polystyrene microspheres; Dongdong Jia, Jonathan Hamilton, Lenu M. Zaman, and Anura Goonewardene
2. Notes on Brownian Motion, A.P. Philipse, pages 17-38
3. R. P. Feynman, The Feynman Lectures in Physics (Addison-Wesley, Reading, MA, 1963), Vol. 1, pp. 41-8_41-10.

לעיון נוסף: המאמר של איינשטיין בנושא בתרגום לאנגלית:

http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gold/pdfs/teaching/einstein_brownian05.pdf

שאלות הכנה

- עבור חלקיק כדורי הנמצא בנוזל דו ממדי: כיצד מגיעים ממשוואת כוחות (לנג'ווין) למשוואה המתארת את תלות ממוצע ריבוע ההעתק $\langle r^2 \rangle$ בטמפרטורה, זמן, צמיגות החומר וגודל החלקיק? אילו הנחות מניחים? איזו הנחה מאפשרת לקשר בין האנרגיה הקינטית לאנרגיה התרמית במערכת?
- מהו חוק סטוקס לצמיגות? מהי צמיגות? מה יחידותיה ומשמעותה? אילו הנחות הנחנו לגבי החלקיק במערכת בכך שאנו עושים שימוש בחוק סטוקס?
- האם מסת החלקיק מופיעה בביטוי? הסבירו.
- מהו מקדם הדיפוזיה ואיך הוא קשור לתנועת חלקיק כדורי בזרם (משוואת סטוקס-איינשטיין)?
- לאילו הבדלים היינו מצפים במקרה שהחלקיק איננו כדורי? היכן הנחנו תלות בגיאומטריית החלקיק?
- על פני אילו פרקי זמן אתם מציעים לבצע את המדידה? מה יגביל את הזמן הקצר ביותר? מה יגביל את הזמן הארוך ביותר?
- מהי ההנחה הארגודית? כיצד היא מאפשרת לפשט את המדידות?
- כיצד תצפו בחלקיקים שגודלם מיקרונים אחדים במיקרוסקופ? כיצד פועלת מיקרוסקופיית dark field?
- להעמקה נוספת: מדוע איבר החיכוך תלוי ברדיוס החלקיק ולא בחזקה אחרת של הרדיוס (פיתוח זה נמצא במאמר הארוך החל מעמוד 56 : חיכוך סטוקס - בזרימה אחידה).

מהלך הניסוי

בניסוי זה תשתמשו בחלקיקי פוליאיתילן כדוריים בגדלים של מיקרונים אחדים הצפים בתמיסה של מים או מים וגליצרול. תצפו בחלקיקים באמצעות מיקרוסקופ אופטי המחובר למצלמה. את הסרטונים שתצלמו תנתחו באמצעות אחת מהתוכנות לניתוח תנועה (ראו בהמשך).

1. **הכרות המערכת ומדידה ראשונית:** השתמשו במיקרוסקופ לקבלת תמונה איכותית של חלקיק הנמצא בתנועה בראונית בתמיסה. בצעו כיוול של הגודל הנראה של החלקיק באמצעות שקף כיוול.
 - כיצד תנתחו את ממוצע ריבוע ההעתק? כמה חלקיקים שונים נדרשים לקבלת תוצאה איכותית? התייחסו להנחה הארגודית.
 - האם החלקיקים חופשיים לנוע בציר Z (בניצב ללוחית המיקרוסקופ)? כיצד זה ישפיע על המדידה?
 - כיצד תוודאו שהמערכת איזוטרופית, כלומר שאין סחיפה לכיוון מסוים? מה ניתן לעשות בניתוח הנתונים כדי להתמודד עם סחף? איך תראה התלות של $\langle r^2 \rangle$ בזמן במקרה של סחיפה?
 - קבלו את התלות של $\langle r^2 \rangle$ בזמן עבור מספר חלקיקים בגדלים שונים. בדקו את התלות בגודל ביחס לצפוי תיאורטית.
2. **תלות בצמיגות:** הוסיפו תמיסת חלקיקים מרוכזת לתערובת של מים וגליצרול בריכוזים שונים. קחו בחשבון את המים שבתמיסת החלקיקים וחשבו מחדש את הריכוז בתמיסה הסופית. השתמשו בטבלאות לחישוב הצמיגות וקבלו תלות של $\langle r^2 \rangle$ ושל מקדם הדיפוזיה בצמיגות. כיצד ניתן להשתמש במדידה זו לחישוב קבוע בולצמן?
3. **תלות בטמפרטורה:** שנו את הטמפ' וחזרו על המדידות בערכי טמפ' שונים. קחו בחשבון את שינוי הצמיגות כתוצאה משינוי הטמפ' (ניתן למצוא מחשבוני וטבלאות לחישוב הבדל זה, שהוא משמעותי).
4. **דיפוזיה של חזית (אופציונאלי):** השתמשו בנוזלים שונים מסיסים במים (חלב, צבע מאכל, דיו) וצפו בחזית התקדמות הנוזל לתוך המים. האם יש לכם אומדן לגודל החלקיקים? האם כל דיפוזיה היא תנועה בראונית?

רעיונות להרחבות:

הרחבות לניתוח התוצאות:

- מצאו חלקיק שאיננו כדורי (לדוגמא, חלקיק המורכב משני חלקיקים צמודים זה לזה). חשבו בעזרת תוכנת tracker את השינוי בזווית. בדקו את התנועה הבראונית שלו בצירים שונים ביחס לצירי הסימטריה שלו.
- מצאו חלקיקים קרובים אך נפרדים. האם יש הבדל בדיפוזיה בציר המחבר ביניהם לעומת הציר הניצב?

הרחבה לניסוי:

האם חלקיקים בתא נעים בתנועה בראונית?

http://www.advancedlab.org/mediawiki/index.php/Brownian_Motion_in_Cells

שימוש בתוכנות לניתוח תנועה

There are two recommended programs for the retrieval of trajectories:

1. MultiTracker plugin in ImageJ

ImageJ is an open source image processing program designed for scientific multidimensional images. ImageJ is highly extensible, with thousands of plugins and macros for performing a wide variety of tasks, and a strong, established user base. One such plugin called MultiTracker enables to track the movement of multiple objects in a video clip. MultiTracker allows automatic and fast analysis of the video

clips. The downside is a non negligible amount of false positives and false negatives which can be reduced either by better thresholding of the images or post processing. ImageJ can be downloaded from: <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>. The MultiTracker plugin can be downloaded from: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/multitracker.html>, which also has information on installation and usage.

2. Tracker

Tracker is a program which tracks objects in a video clip. Tracker is semi-manual in the sense that the user has to identify and select the object to track in the first frame of the movie and then the program locates the object in all consecutive frames automatically. Tracker is easy to use and pretty straightforward. It also gives the information on the rotation of the body which can be useful for the study of rotational diffusion. The downside is its manual approach and it's more time consuming handling. Tracker can be downloaded from: <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/> which also has good documentation and tutorials. Once the trajectories are found from the programs, further analysis is simple to do with Matlab or any other programming environment.